

УДК 681.511.22

Автоматическое удержание цвета излучения при регулировании спектра светодиодного кластера

Мезенцева С. Г. *, Арапова С. П., Арапов С. Ю.

*Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 32, Р041, Екатеринбург, Россия, 620002
sofya.mezenceva.94@mail.ru*

Аннотация. В статье представлен метод автоматического удержания заданной цветности и яркости освещения, при изменении спектрального состава, создаваемого мультиспектральным светодиодным кластером. С помощью программного обеспечения кластер позволяет из различных комбинаций СИД генерировать спектры, близкие по цветности к стандартным осветителям МКО серии D, регулировать их цветовую температуру и яркость. Экспериментальная проверка показала, что полученная цветность близка к заданной, а дрейф цветности при манипуляциях спектром незначителен. Отклонения сопоставимы общепринятым порогом различимости.

Ключевые слова: светодиодный модуль, автоматизированное управление, кларификация, стандартный осветитель, цветность.

Automated color withholding when adjusting the spectrum of the led cluster

Mezentseva S. G. *, Arapova S. P., Arapov S. Yu.

Ural Federal University, Mira, 32, R041, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. The article presents a method for automatically retain the pre-determined chromaticity and brightness, while changing the spectra of multispectral LED cluster. With the help of the software cluster allows different combinations of LEDs to generate the spectra, similar chromaticity to standard CIE illuminants D, and adjust their color temperature and brightness. Experimental verification showed that the chromaticity is close to the specified and drift of color in the spectrum manipulation is small. Deviation comparable to the the generally accepted threshold of noticeability.

Keywords: LED module, automated control, clarification, standard illuminator, chromaticity.

Введение

Устройства на основе светоизлучающих диодов (СИД) набирают всё большую популярность. Появляются новые эффективные источники светового излучения, основанные на СИД, которые отличаются надёжностью, экономичностью, экологической безопасностью и большим сроком службы. Переход на светодиодное освещение обусловлен творческой свободой и разнообразием конструкций светильников, безвредной утилизацией, а также возможностью контроля интенсивности света и его спектральных характеристик.

В работах [1, 2] зафиксирован и исследован эффект кларификации или эффект «приукрашивания» [3], который возникает при специфическом освещении RGB+W и заключается в увеличении визуально-воспринимаемой насыщенности цветов отражающих объектов, т.е. с помощью изменения спектрального состава освещения возможно управление восприятием цветов при константности восприятия самого освещения. Широкий ассортимент и узкий спектр СИД, лёгкость в управлении даёт возможность создания освещения, максимально приближенного по цветности к стандартному, которое можно сгенерировать с помощью различных комбинаций СИД, например — RGB, а также, используя сочетание жёлтого, голубого и синего, либо жёлтого, зелёного и синего и т.д.

На базе RGB и других СИД возможно конструирование источников света, воспроизводящих цветности стандартных осветителей, например — D50. Подобные решения приведены в работах [4–6], их целью было добиться удержания цветности при изменении спектрального состава. В работах [5,6], был разработан метод управления СИД, позволяющий регулировать коррелированную цветовую температуру (Ткц), яркость, и индекс цветопередачи (Ra), влияющий на визуальную воспринимаемую насыщенность отражающих объектов. Метод узкоспециализированно подходит для сочетания СИД RGB+W. Приводятся данные о том, что цвет источника всё же отклоняется от целевого, анализируются причины отклонений.

Изменение спектра освещения при постоянстве его цвета ведёт к возникновению ярко выраженных визуальных эффектов, заключающихся в «необъяснимом изменении цвета» отражающих объектов. Если цвет освещения не меняется, то эффекты проявляются нагляднее. Таким образом, целью работы является автоматическое удержание цвета излучения при регулировании спектра светодиодного кластера, заключающегося в постепенной смене яркости и состава работающих излучателей.

1. Метод автоматического удержания цветности

Метод автоматического удержания цветности, позволяющий изменять энергетические яркости компонентов, приведён в статье [5, 6], однако он нуждается в модификации под рассматриваемый случай, т.к. вместо стандартных RGBW в МСК могут использоваться произвольные СИД. Например, цветность D50 (рис. 1) может быть получена с помощью сочетаний СИД: RGB, YCB, YGB поэтому в дальнейших выкладках будем обозначать их просто номерами — 1, 2 и 3. Процесс перехода от одного сочетания к другому заключается в повышении мощности дополнительного диода — 4, яркость которого является регулируемым параметром. СИД 4 при этом замещает какой-либо из набора 1, 2, 3.

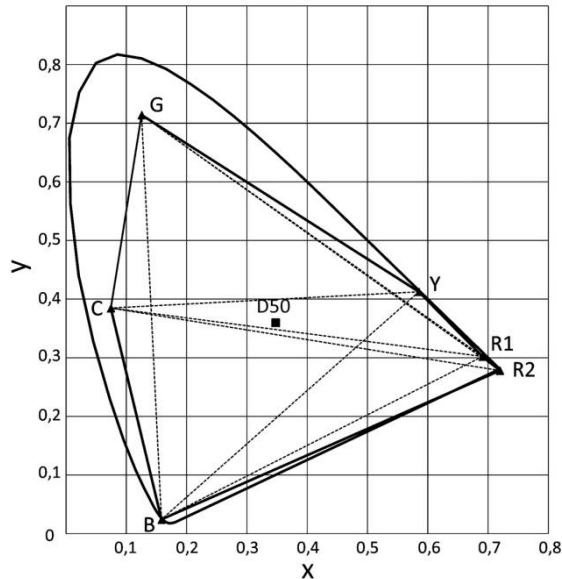


Рис. 1. Примеры цветности широко распространенных СИД

Как и в [5, 6], интересующие нас яркости могут быть получены из решения уравнения:

$$X^T(S_{1234}a - s_d) = X^T S_{1234d}[h_1 h_2 h_3 h_4 h_5]^T = X^T S_{1234d}h = 0, \quad (1)$$

где X — это ФСЦ стандартного наблюдателя $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ системы XYZ МКО 1964, $S_{1234d} = [s_1, s_2, s_3, s_4, -s_d]$ — матрица, составленная из векторов-спектров СИД 1, 2, 3 и 4, h — вектор, содержащий яркости компонентов из которых можно получить интересующие нас скважности ШИМ. Добавление дополнительной компоненты h_5 в вектор h не вносит принципиальных изменений в задачу его отыскания, ввиду её однородности. Яркость стандартного источника, определяющую значением h_5 можно считать произвольной. Общее решение уравнения (1) можно представить в виде разложения по базису:

$$h^* = b_1 \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b_2 \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = b_1 \alpha_1 + b_2 \alpha_2, \quad (2)$$

где значения a_{ij} легко находятся с помощью стандартных алгоритмов, а коэффициенты b_1 и b_2 могут быть произвольными. Физический смысл векторов α_1 и α_2 из (2) определяется их компонентами: a_{12}, a_{22}, a_{32} — яркости СИД 1, 2 и 3, соотношение которых обеспечивает совпадение cs_d по цветности, а их абсолютные значения — совпадение cs_d по яркости. a_{11}, a_{21}, a_{31} — изменения яркости диодов 1, 2 и 3 при добавлении единичной яркости, замещающего СИД 4.

Далее из множества всех решений уравнения (1) необходимо выбрать единственное, соответствующее заданным текущим значениям регулируемых параметров. Следует отметить что один из этих параметров — «оттенок освещения», в виде $T_{кц}$ уже неявно заложен в (2), поскольку на его основе рассчитывается вектор s_d . Что касается яркости замещающего СИД и общей яркости освещения, то они определяются соответственно коэффициентами b_1 и b_2 .

Как и в работе [5] коэффициенты b_1 и b_2 выбираются исходя из возможностей источника. Коэффициент b_2 отвечает за регулировку яркости, и ограничения, накладываемые на его значения аналогичным предложенным в [5]:

$$0 \leq b_2 \leq \frac{1}{\max\{a_{12}, a_{22}, a_{32}\}}, \quad (3)$$

но выбор b_1 ограничивается несколько иным образом. В работе [5] из-за используемого набора спектров значения a_{11}, a_{21}, a_{31} всегда получались отрицательными, что позволяло упрощать ограничивающие условия. При произвольном выборе трёх базовых и одного замещающего осветителя такое происходит не всегда, и процедура определения максимального значения b_1 несколько усложняется:

$$0 \leq b_1 \leq \min\{B_{max1}, B_{max2}, B_{max3}, 1\}, \quad (4)$$

где формулы для вычисления значений $B_{max1}, B_{max2}, B_{max3}$ зависят от знаков элементов решения a_{11}, a_{21}, a_{31} :

$$\begin{aligned} B_{maxi} &= -\frac{a_{i2}b_2}{a_{i1}}, \text{ если } a_{i1} < 0, \\ \text{и } B_{maxi} &= \frac{1-a_{i2}b_2}{a_{i1}}, \text{ если } a_{i1} > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Соблюдение данного набора ограничений гарантирует, что рассчитанные нормированные яркости СИД будут лежать в пределах от нуля до единицы.

Постановка эксперимента

В эксперименте был использован осветитель, представляющий собой автоматизированный мультиспектральный светодиодный кластер (МСК) с девятью независимыми спектральными каналами. Конструкция МСК даёт возможность быстрой замены излучающих компонентов, а спектральный состав излучения

кластера может быть легко изменён под конкретную исследовательскую задачу. Возможно осуществлять регулировку яркости в широких пределах, а также управлять цветностью освещения. Смешивание световых потоков обеспечивает равномерность спектрального состава во всей рабочей зоне.

Управление яркостью компонентов осуществляется автоматизированной системой на основе драйверов с широтно-импульсной модуляцией. Регулировка яркости СИД осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции питания на основе ключей из полевых транзисторов IRLML2502. Управление ключами осуществляется с помощью микроконтроллера ATmega2560, который работает под управлением программы-монитора. Программа свободно распространена, позволяет взаимодействовать с выходами контроллера.

Конструкция кластера подробно расписана в статье [7], внешний вид устройства приведён на фотографии (рис. 2). Значения спектральной облучённости регистрируются спектрофотометром i1-Pro (X-Rite) в комплексе с открытым программным пакетом Argyll CMS в диапазоне 370–730 нм с шагом 3,33 нм.

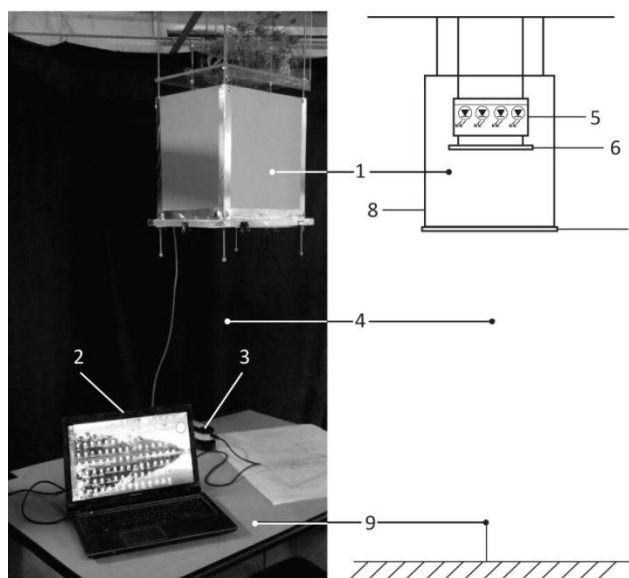


Рис. 2. Внешний вид устройства: 1 — устройство (МСК); 2 — управляющий компьютер;
3 — спектрофотометр; 4 — рабочая зона; 5 — платформа-радиатор МСК с закреплёнными на ней СИД; 6, 7 — рассеиватели; 8 — отражающая поверхность (алюминий); 9 — стол

Эксперимент направлен на проверку автоматического удержания неизменной цветности и яркости освещения, создаваемого кластером, который управляется с помощью разработанного метода.

Проводились измерения спектров каждого канала осветителя. Значения яркости взяты с шагом 10, от 0 до 250, а также максимальная яркость 255.

2. Результаты эксперимента

Для создания цветности, близкой к осветителю типа D, использовались следующие комбинации СИД: RGB, YCB, YGB. Проводились измерения для коррелированной цветовой температуры освещения $T_{кц} = 4500, 5000, 5500$ К. Диапазон яркости условно поделён на 100 долей, взята середина диапазона (яркость 40, 50, 60). На рис. 3 показаны спектры осветителя D50 в равноконтрастной системе $u'v'$ (МКО 1976 г.) при яркости СИД = 50.

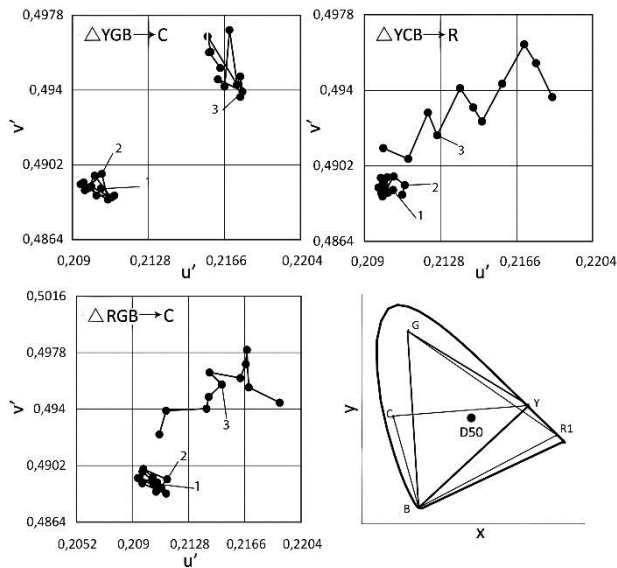


Рис. 3. Траектории изменения цветности: 1 — теоретические значения цветности D50; 2 — значения с округлением до 1/256; 3 — значения цветности, полученные экспериментально

Смещение цветности освещения возможно из-за смещения цветности СИД. Для проверки этой гипотезы по полученным данным была построена диаграмма смещения цветности СИД в равноконтрастной системе $u'v'$ (рис. 4).

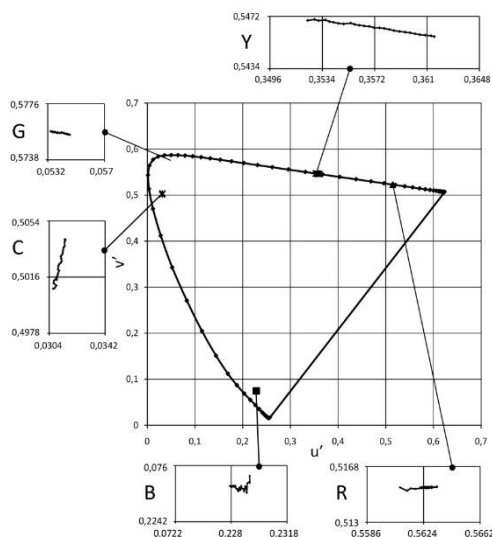


Рис. 4. Спектры СИД в равноконтрастной системе $u'v'$ (МКО 1976 г.)

Смещение цветности лежит в пределах одинарного порога различимости (0,0038 по диаграмме $u'v'$). Исключением является жёлтый светодиод с длиной волны 593 нм, который сильно отклоняется от нормы, это возможно из-за нагрева самого СИД, или каких-то пока ещё неустановленных недостатков аппаратной части прибора, или большей чувствительности человеческого глаза в средней части цветового охвата. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

Выводы

Разработан метод, позволяющий удерживать заданную цветовую температуру и яркость освещения мультиспектрального светодиодного кластера, при изменении его спектрального состава.

Изменение спектра освещения при постоянстве его цвета ведёт к возникновению ярко выраженных визуальных эффектов, заключающихся в «необъяснимом изменении цвета» отражающих объектов.

Разработанная система управления проверена на примере имитации стандартного осветителя D50. Дрейф цветности визуально незначителен, в целом, цвет воспринимается как белый. Это может быть связан с отклонениями цветности, используемых СИД. Уточнение других возможных причин дрейфа, требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Зрительный эксперимент по определению предпочтительной насыщенности цвета / Миллер К. [и др.] // Светотехника. 2015. № 5. С. 12–18.
2. Арапова С.П., Арапов С.Ю., Москвичёв С.А. Применение эффекта кларификации в полиграфии // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 82–90.
3. Лебедева С.М., Лузина Ю.А. Исследование эффекта «приукрашивания» цвета разнотелными излучениями // Светотехника. 2016. № 1. С. 25–30.
4. Буданова А. Управление цветом комбинированного светодиодного RGB-источника света // Полупроводниковая светотехника. 2010. Т. 3, № 5. С. 32–35.
5. Арапов С.Ю., Арапова С.П., Тягунов А.Г. Гибридный лабораторный источник света для полиграфии, спектрально близкий к стандартным излучателям «D» // Светотехника. 2016. № 2. С. 24–28.
6. Арапова С.П., Арапов С.Ю., Суворова Ю.Л. Метод управления индексом цветопередачи для светодиодных модулей RGBW // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 91–103.
7. Арапова С.П., Арапов С.Ю., Мезенцева С.Г. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. Р. 104–111.